

УДК 621.91

Ю.Г. Кравченко, канд. техн. наук, Дніпро,  
Н.В. Крюкова, Харків, Україна

## **ЕЛЕМЕНТНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ ТОЧІННЯ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ПЛАСТИНАМИ ІЗ ПКНБ**

*Розроблена спрощена методика визначення елементних показників (напружень та коефіцієнтів тертя) на передній та задній поверхнях леза, наведено приклад їх розрахунку для процесу точіння полікристалічним кубічним нітридом бора (ПКНБ) загартованої сталі.*

**Ключові слова:** сили різання, напруження, коефіцієнт тертя, площина зсуву, режим різання, геометрія леза

*Разработана упрощенная методика определения элементных показателей (напряжений и коэффициентов трения) на передней и задней поверхностях лезвия, приведен пример их расчета для процесса точения поликристаллическим кубическим нитридом бора (ПКНБ) закаленной стали.*

**Ключевые слова:** силы резания, напряжение, коэффициент трения, плоскость сдвига, режим резания, геометрия лезвия

*A simplified method to determine the elemental parameters (stresses and friction coefficients) on the rake face and flank of the cutting wedge is developed. Their calculation for turning of hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride (PcBN) is given as an example.*

**Keywords:** cutting forces, stress, friction coefficient, plane of shear, cutting mode, geometry of wedge

### **Вступ**

Для аналітичного розрахунку складових сили різання (дотичної  $P_z$ , радіальної  $P_y$  і осової  $P_x$  проєкцій) і контактних температур різання, які є важливими механо-термічними показниками оптимізаційної моделі процесу різання, необхідні вихідні дані по дотичним напруженням  $\tau_s$  в умовній площині зсуву  $P_\phi$ , по напруженням  $\tau_\gamma$ ,  $\tau_\alpha$  і коефіцієнтам тертя  $\mu_\gamma$ ,  $\mu_\alpha$  на передній  $A_\gamma$  та задній  $A_\alpha$  поверхнях леза.

Одним із напрямків визначення елементних показників процесу різання пропонується метод «зворотнього» розрахунку на основі експериментальних даних динамометрування у вигляді спеціальної структури силових залежностей від режимних параметрів і геометрії леза.

Мета роботи – одержати розрахункові вирази і значення для напружень та коефіцієнтів тертя при точінні загартованих сталей надтвердими лезовими матеріалами на основі полікристалічного кубічного нітриду бора (ПКНБ).

Актуальність дослідження пов'язана з відсутністю достатньо напрацьованої інформаційної бази по елементним механічним показникам процесу різання матеріалів високої твердості.

### Постановка задачі

Основою розрахунку прийняті два положення з механіки процесу різання.

1. Система рівнянь рівноваги представлених на рис. 1 дотичної  $P_z$  і в основній площині нормальної  $P_N$  складових сили різання  $P$  [1, 2]

$$\left. \begin{aligned} P_z &= F_\gamma \cdot \sin \gamma + N_\gamma \cdot \cos \gamma + F_\alpha \\ P_N &= F_\gamma \cdot \cos \gamma - N_\gamma \cdot \sin \gamma + N_\alpha \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $F$  і  $N$  з індексами  $\gamma$  та  $\alpha$  – сили тертя і тиску на передній  $A_\gamma$  і ділянці зносу задньої  $A_\alpha$  поверхонь,  $\gamma$  – передній кут.

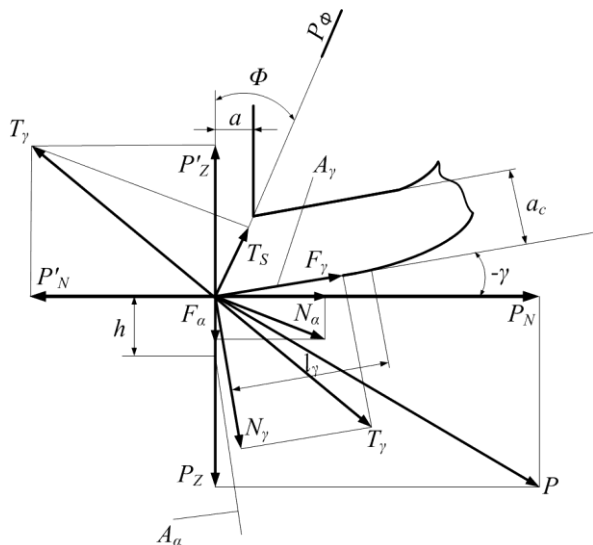


Рисунок 1 – Схема сил, які діють в площині зсуву  $P_\phi$  і на передній  $A_\gamma$  та задній  $A_\alpha$  поверхнях леза при вільному прямокутному різанні

В (1) нормальна складова сили різання дорівнює

$$P_N = (P_y^2 + P_x^2)^{0.5} \quad (2)$$

## 2. Рівняння зв'язку сил стружкоутворення

$$T_s = N_\gamma \cdot \cos(\phi - \gamma) - F_\gamma \cdot \sin(\phi - \gamma), \quad (3)$$

яке отримується проєцюванням  $N_\gamma$  і  $F_\gamma$  на напрямок  $T_s$  (рис. 1). Кут зсуву  $\tan \phi = \cos \gamma / (k_a - \sin \gamma)$  звичайно визначається через коефіцієнт потовщення стружки  $k_a = a_c / a$  ( $a = s \cdot \sin \phi$  – товщина зрізу,  $s$  – подача,  $\phi$  – кут в плані).

Вихідними даними служили емпіричні залежності складових  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  від елементів режиму різання (глибини  $t$ , подачі  $s$ , швидкості  $v$ ) і геометричних параметрів леза (переднього кута  $\gamma$ , радіуса при вершині  $r$ , величини фаски зносу  $h$  по  $A_\alpha$ ) зі структурою

$$P_i = c_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^z (1 - \gamma/90)^\eta (1 + r)^V (1 + h)^u, \quad (4)$$

що дозволяє визначати  $P_z$  і  $P_N$  при нульових значеннях  $r$  і  $h$ . Цим моделюється перехід від умов невідного різання до схеми вільного різання (незначною похибкою впливу роботи допоміжної різальної кромки при  $r = 0$  нехтуємо) з  $\phi = 90^\circ$  при врізному точінні диска з радіальною подачею ( $P_N = P_y$ ) або торцевому точінні втулки з осьовою подачею ( $P_N = P_x$ ).

## Основна частина

Рішення задачі складається з трьох блоків.

1. Площина зсуву  $P_\phi$ . Після підстановки роздільного значення сил тертя і тиску на  $A_\gamma$  із спільного рішення (1)

$$\left. \begin{aligned} F_\gamma &= (P_z - F_\alpha) \sin \gamma + (P_N - N_\alpha) \cos \gamma \\ N_\gamma &= (P_z - F_\alpha) \cos \gamma + (P_N - N_\alpha) \sin \gamma \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

в вираз (3) і пов'язаних з розкладанням функцій  $\sin(\phi - \gamma)$  і  $\cos(\phi - \gamma)$  скорочень знаходимо

$$T_s = (P_z - F_\alpha) \cos \phi - (P_N - N_\alpha) \sin \phi$$

з вихідними даними (4).

При теоретично гострому лезі ( $h = 0$ ,  $F_\alpha = N_\alpha = 0$ ) маємо:

$$T_s = P'_z \cos \phi - P'_N \sin \phi \text{ і } \tau_s = T_s / (l_s \cdot b), \quad (6)$$

де  $l_s = a/\sin \phi$  – довжина площини  $P_\phi$ ;  $b = t/\sin \varphi$  – ширина зрізу.

2. Передня поверхня  $A_\gamma$ . При значеннях  $P_z'$  і  $P_N'$  ( $F_\alpha = N_\alpha = 0$ ) із (5) отримуємо:

$$F_\gamma = P_z' \sin \gamma + P_N' \cos \gamma \quad \text{і} \quad \tau_\gamma = F_\gamma / (l_\gamma \cdot b). \quad (7)$$

Довжина контакту стружки з  $A_\gamma$  обчислювалась по формулі [3] з поправкою [4]

$$l_\gamma = a \cdot k_a^{0,1} [k_a (1 - \operatorname{tg} \gamma) + 2/\cos \gamma]$$

Коефіцієнт тертя  $\mu_\gamma = F_\gamma / N_\gamma$  вираховується [5] при відомій  $T_s$  (6) із рівняння (3)

$$T_s = F_\gamma [\cos(\phi - \gamma) / \mu_\gamma - \sin(\phi - \gamma)]$$

по формулі

$$\mu_\gamma = \cos(\phi - \gamma) \cdot [T_s / F_\gamma + \sin(\phi - \gamma)]^{-1}. \quad (8)$$

Підстановка значень  $T_s$  (6) і  $F_\gamma$  (7) в  $\mu_\gamma$  (8) призводить до відомої формули [6] із системи (5) без значення кута  $\phi$

$$\mu_\gamma = (P_z' \cdot \operatorname{tg} \gamma + P_N') / (P_z' - P_N' \cdot \operatorname{tg} \gamma). \quad (9)$$

3. Задня поверхня  $A_\alpha$ . Значення  $F_\alpha$  визначається із (1) через  $F_\gamma$  (7) і  $\mu_\gamma$  (8, 9):

$$F_\alpha = P_z - F_\gamma (\sin \gamma + \cos \gamma / \mu_\gamma) \quad \text{і} \quad \tau_\alpha = F_\alpha / (h \cdot b). \quad (10)$$

Коефіцієнт тертя  $\mu_\alpha = F_\alpha / N_\alpha$  вираховується із (1)

$$\mu_\alpha = \frac{P_z - F_\gamma (\sin \gamma + \cos \gamma / \mu_\gamma)}{P_N - F_\gamma (\cos \gamma - \sin \gamma / \mu_\gamma)}. \quad (11)$$

$$3 \quad F_{\gamma} (\sin \gamma + \cos \gamma / \mu_{\gamma}) = P_z' \quad \text{і} \quad F_{\gamma} (\cos \gamma - \sin \gamma / \mu_{\gamma}) = P_N' \quad \text{із (1) при } h = 0$$

в (11) маємо

$$\mu_{\alpha} = (P_z - P_z') / (P_N - P_N'). \quad (12)$$

### Розрахунки і аналіз

Емпіричні залежності (4) для загартованої інструментальної сталі 9ХС HRC=60 приведені в табл. 1.

Різальним матеріалом служив ПКНБ марки кіборіт у вигляді змінних пластин і марки ніборіт у вигляді вставок з напаяною пластиною на твердосплавній підложці.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів пропорційності  $C_p$  і показників степенів  $x-u$  в залежності (4) при кутах в плані  $\varphi = \varphi' = 45^\circ$ , задніх  $\alpha = \alpha' = 8^\circ$ , нахилу різальної кромки  $\lambda = 0^\circ$  і сухому різанні [7, 8]

Найменування сил, $H$	$C_p$	$x$	$y$	$-z$	$\eta$	$v$	$u$
		$t$ , мм	$s$ , мм/об	$v$ , м/с	$(1-\gamma/90)$	$(1+r)$ , мм	$(1+h)$ , мм
Дотична $P_z$	1554	0.85	0.67	0.18	0.6	0.15	0.6
Радіальна $P_y$	1133	0.87	0.64	0.12	1.4	0.23	1.5
Осьова $P_x$	671	0.96	0.53	0.13	1.2	-0.19	1.3

Значення раціональних параметрів (умов обробки) [7, 8], порядок і результати розрахунків елементних показників процесу різання зведені в табл. 2.

Виходячи з порівняльних даних табл. 2, найбільші дотичні напруження розвиваються в площині зсуву ( $\tau_s$ ), а найменші – на задній поверхні ( $\tau_{\alpha}$ ). В цілому значення  $\tau_{\gamma}$  і  $\mu_{\gamma}$  значно перевищують величини  $\tau_{\alpha}$  і  $\mu_{\alpha}$ . По мірі зношування леза відбувається незначне зменшення  $\tau_{\alpha}$  і  $\mu_{\alpha}$ .

Таблиця 2 – Розрахункові значення елементних показників  $\tau$  і  $\mu$  по залежностям (4) і табл. 1

Найменування вихідних параметрів і розрахункових показників		Значення параметрів і показників
		Сталь 9XC
Режим різання	глибина $t$ , мм	0.5
	подача $s$ , мм/об	0.2
	швидкість $v$ , м/с	1.0
Геометрія леза	кут $\gamma$ , град.	-20
	радіус $r$ , мм	1.6
	знос $h$ , мм	0.2/0.6
Переріз зрізу	товщина $a \cdot 10^{-3}$ , м	0.14
	ширина $b \cdot 10^{-3}$ , м	0.71
Сили при $r = 0, h = 0$	дотична $P_z'(4), H$	331
	нормальна $P_N'(4), (2), H$	348
Площина зсуву $P_\phi$	коефіцієнт $k_a$	1,5
	кут $\phi$ , град.	27
	довжина $l_s \cdot 10^{-3}$ , м	0,31
	сила $T_s(6), H$	136
	напруження $\tau_s(6)$ , МПа	618
Передня поверхня $A_\gamma$	довжина $l_\gamma \cdot 10^{-3}$ , м	0,61
	сила $F_\gamma(7), H$	214
	напруження $\tau_\gamma(7)$ , МПа	494
	коефіцієнт $\mu_\gamma(8), (9)$	0,50
Задня поверхня $A_\alpha$ при $h_1/h_2$	сила $P_z(4), H$	369/439
	сила $P_N(4), (2), H$	455/686
	сила $F_\alpha(10), H$	40/110
	напруження $\tau_\alpha(10)$ , МПа	282/258
	коефіцієнт $\mu_\alpha(11), (12)$	0,36/0,32

## **Висновки**

1. Отримано аналітично розрахункові формули для напружень в площині зсуву та для трибологічних показників на передній та задній поверхнях леза.

2. Значення дотичної та нормальної складових сили різання для гострого леза визначається на основі «емпірико-зворотнього» методу розрахунку.

3. Встановлено розрахункові значення напружень зсуву і контактних напружень та коефіцієнтів тертя на передній поверхні та на ділянці зносу задньої поверхні леза.

**Список використаних джерел:** 1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с. 2. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 319 с. 3. Абуладзе Н.Г. Определение длины контакта сливной стружки с передней поверхностью инструмента. – Тр. Грузинского политехн. ин-та. – Тбилиси: ГПИ, 1969. – № 3. – С. 131-137. 4. Розенберг Ю.А. Методы аналитического определения степени деформации металла стружки при резании // Вестник машиностроения. – 2001. – № 3. – С.34-38. 5. Кравченко Ю.Г., Дербабя В.А., Крюкова Н.В. К вопросу эмпирического определения напряжений и коэффициентов трения при стружкообразовании. – Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. – Вып. 85. – С.137-148. 6. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с. 7. Кравченко Ю.Г. Параметрическая оптимизация условий точения закаленных сталей пластинами из ПКНБ. – Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – Вып. 77. – С. 107-113. 8. Кравченко Ю.Г., Пиньковский С.Г. Выбор целевой функции оптимизационной модели процесса точения закаленной стали пластинами из ПКНБ. – Науковий вісник НГУ: Науч.-техн. журнал. – Дніпропетровськ: Нац. гор. ун-т, 2010. – № 7-8 (117-118). – С.68-73.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zorev N.N. Voprosy mehaniki processa rezanija metallov. – M.: Mashgiz, 1956. – 367 s. 2. Rozenberg A.M., Eremin A.N. Jelementy teorii processa rezanija metallov. – M.: Mashgiz, 1956. – 319 s. 3. Abuladze N.G. Opredelenie dliny kontakta slivnoj struzhki s perednej poverhnost'ju instrumenta. – Tr. Gruzinskogo politehn. in-ta. – Tbilisi: GPI, 1969. – № 3. – S. 131-137. 4. Rozenberg Ju.A. Metody analiticheskogo opredelenija stepeni deformacii metalla struzhki pri rezanii // Vestnik mashinostroenija. – 2001. – № 3. – S.34-38. 5. Kravchenko Ju.G., Derbaba V.A., Krjukova N.V. K voprosu jempiricheskogo opredelenija naprjazhenij i koeficientov trenija pri struzhkoobrazovanii. – Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: NTU «HPI», 2015. – Vyp. 85. – S.137-148. 6. Makarov A.D. Iznos i stojkost' rezhushhix instrumentov. – M.: Mashinostroenie, 1966. – 264 s. 7. Kravchenko Ju.G. Parametricheskaja optimizacija uslovij tochenija stalej plastinami iz PKNB. – Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: NTU «HPI», 2009. – Vyp. 77. – S. 107-113. 8. Kravchenko Ju.G., Pin'kovskij S.G. Vybora celevoj funkcii optimizacionnoj modeli processa tochenija zakalenoj stali plastinami iz PKNB. – Naukovij visnik NGU: Nauch.-tehn. zhurnal. – Dnipropetrovsk: Nac. gor. un-t, 2010. – № 7-8 (117-118). – S.68-73.